

4.15 Methanhydrate in marinen Sedimenten – Einfluss auf Klima und Stabilität der Kontinentalränder

GERHARD BOHRMANN

Methan hydrate in marine sediments – impact on climate and slope stability: Although the existence of gas hydrates has now been known for decades, our understanding of their potential impact on slope stability, carbon cycling, and climate change is still in its infancy. Although the total amount of carbon trapped in gas hydrate is not well constrained, existing knowledge suggest that these deposits may constitute a significant carbon reservoir, but a quantitative evaluation of its resource potential depends on reliable global and national inventories, and a better understanding of the geologic factors that lead to highly concentrated hydrate deposits.

Gashydrate sind feste, eisähnliche Verbindungen aus Gasmolekülen und Wasser, welche je nach Wassertemperatur im Ozean und entsprechendem Druck ab 300–700 m Wassertiefe in Form von Methanhydraten vorkommen (BOHRMANN et al. 2001). Neben Methan bilden andere Gase, wie Kohlenstoffdioxid, Stickstoff und weitere Kohlenwasserstoffe bei höheren Drücken und niedrigen Temperaturen ebenfalls diese feste Verbindung. Aufgrund der geringeren Temperaturen der hohen Breiten können Gashydrate in solchen Gebieten generell auch in geringeren Wassertiefen vorkommen, wobei folgende Fragestellungen im Vordergrund stehen: Können oder sollen Methanhydrate möglicherweise als Energieressource in Zukunft genutzt werden? Wie sind Methanhydrate in den Kohlenstoffkreislauf eingebunden und welche Wechselwirkung und Bedeutung haben sie im Klimageschehen? Welche Rolle haben sie bei der Zementierung der Kontinentalhänge und bei der Auslösung von Rutschungen?

Struktur und Aufbau der Gashydrate

Gashydrate sind nicht-stöchiometrische Verbindungen, wobei die Wassermoleküle als so genannte Struktur-moleküle Käfigstrukturen aufbauen (Abb. 4.15-1), in denen Gasmoleküle als Gastmoleküle eingeschlossen sind (BOHRMANN & TORRES, in press). Sie werden deshalb auch

Käfigverbindungen oder Clathrate (von lat. *clatratus* Käfig) genannt. Generell können Gashydrate bei ihrer Bildung gleichzeitig verschiedene Gasmoleküle abhängig von ihrer Häufigkeit in der Umgebung in getrennten Käfigen einbauen. Neben Methan sind dies vor allem H_2S , CO_2 und seltener höhere Kohlenwasserstoffe wie Ethan bis Butan. Bisher sind in der Natur drei unterschiedliche Kristallstrukturen bekannt (SLOAN 2003; Strukturen I und II sowie die Struktur H). Die Struktur der Gashydrate kann dabei als eine Packung von Polyederkäfigen aufgefasst werden, wobei fünf verschiedene Polyederkäfige beteiligt sein können.

Stabilität und Vorkommen in der Natur

Zur Bildung von natürlichem Gashydrat sind neben der Verfügbarkeit von Gas in Übersättigung und Wasser, die Druck-Temperatur-Bedingungen die entscheidenden Faktoren. Gashydrate sind generell nur bei hohen Drücken und relativ niedrigen Temperaturen stabil (Abb. 4.15-2). Auf der Erde treten überwiegend Methanhydrate auf, die aufgrund des weit verbreiteten Faulgases Methan und ihrer physikalischen Stabilitätsbedingungen (Abb. 4.15-2) prinzipiell in Meeressedimenten vorkommen wie auch in Permafrostböden der polaren Regionen (KVENVOLDEN

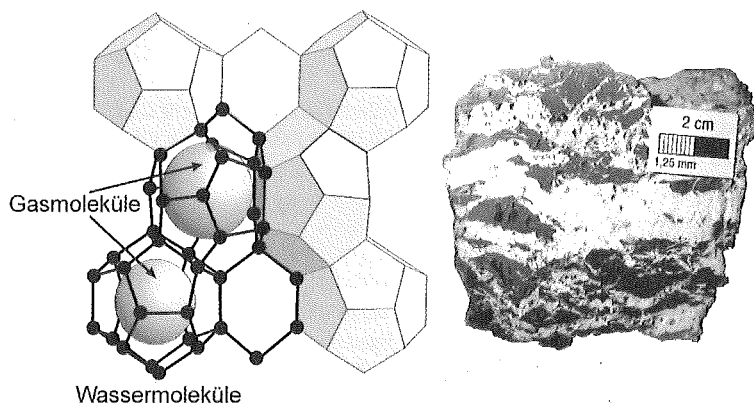


Abb. 4.15-1: Schematische Darstellung der Gashydratstruktur I (links). Gashydrat/Sediment-Wechsellagerung in einem Handstück aus 780 m Wassertiefe vom Hydratrücken vor der Küste von Oregon (SUESS et al. 1999).

1988). In den Sedimenten der Ozeanböden stammt das Methan zu einem großen Anteil aus dem mikrobiellen Abbau organischen Materials bzw. aus der bakteriellen Kohlenstoffdioxid-Reduktion in so genannten anoxischen Ablagerungen, wie sie ab einer bestimmten Tiefe unter dem Meeresboden in fast allen Sedimentbecken vorkommen. Teilweise wird es aber auch durch thermokatalytische Umwandlungsprozesse in noch tieferen Sedimentschichten gebildet, bevorzugt im Zusammenhang mit

Erdöllagerstätten. Die bei weitem höchsten Anteile an Methan entstehen im Bereich der Kontinentalränder, wo durch hohe Planktonproduktion der Ozeane und durch hohe Sedimentationsraten, große Mengen von organischem Material zur Ablagerung kommen und für die Gasbildung zur Verfügung stehen. Daher sind Gashydrate global an allen passiven und aktiven Kontinentalrändern zu finden, aber auch in allen Randmeeren, wie im Schwarzen Meer, im Mittelmeer und im Baikalsee, wo ähnliche Bedingungen herrschen. Vorkommen im Kaspischen Meer und im Golf von Mexiko sind überwiegend an Kohlenwasserstofflagerstätten gebunden.

Alle bisher bekannten Gashydratvorkommen wurden vom *United States Geological Survey* zusammengestellt (USGS). Gashydrate wurden bisher an mehr als 25 Lokationen beprobt oder durch geochemische Analysen wie z.B. Chlorid-Anomalien (TRÉHU et al. 2004) im Porenwasser von Sedimenten nachgewiesen. An mindestens 80 Lokationen ist die Existenz von Gashydraten durch die geophysikalische Registrierung eines Boden-simulierenden Reflektors (BSR) nachgewiesen. Der BSR ist ein seismischer Reflektor mit negativem Reflexionskoeffizienten. Er entsteht an der Grenzfläche von hydrathaltigen Sedimenten zu solchen mit freiem Methangas. BSR-Strukturen verlaufen entlang von Isothermen nahezu parallel zur Morphologie des Meeresbodens und folgen nicht dem Verlauf stratigraphischer Horizonte, sondern können geneigte Flächen schneiden (Abb. 4.15-3). Der Reflektor tritt in Tiefen bis zu einigen hundert Metern unterhalb des Meeresbodens auf und zeigt die Untergrenze der Zone

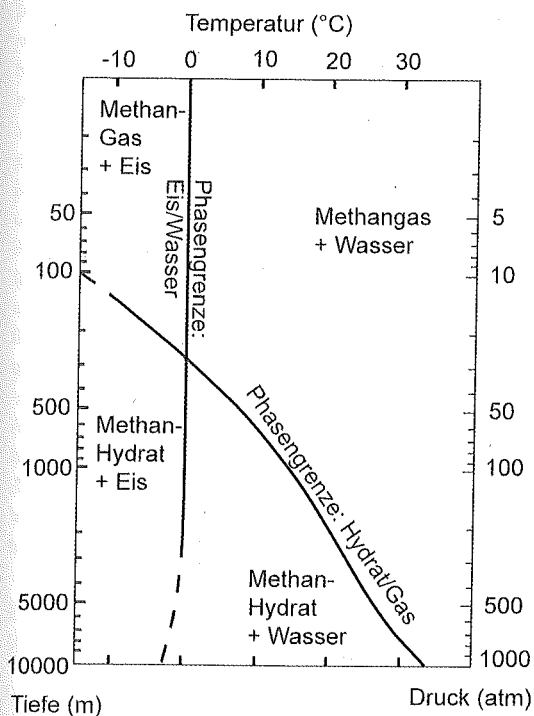


Abb. 4.15-2: Stabilität von Methanhydrat idealer Zusammensetzung (schattiertes Feld) in Abhängigkeit von Druck und Temperatur (KVENVOLDEN).

Intervall-Geschwindigkeit (m/s)

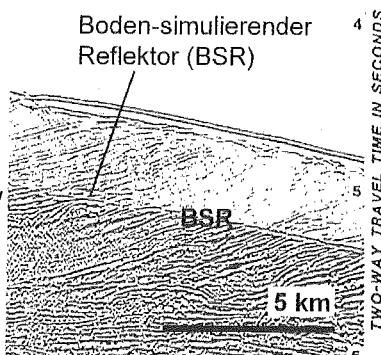
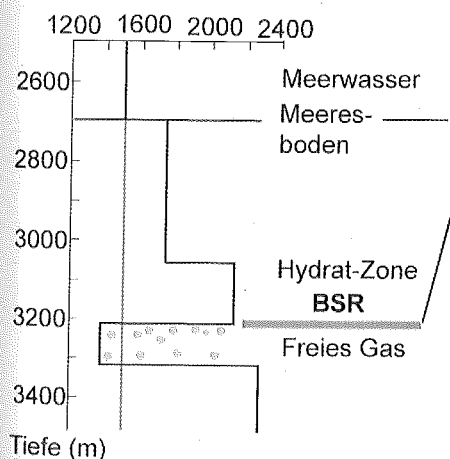


Abb.4.15-3: Seismische Aufzeichnung von gashydratföhrnden Sedimenten am Blake-Rücken (rechts; nach PAULL et al. 1996). Unterschiedlich schwache Reflexionen oberhalb des BSR weisen auf eine unterschiedlich starke Füllung des Porenraumes mit Gashydrat hin. Unterhalb des BSRs föhrt freies Gas im Porenraum zu starken Reflexionen. Das Modell der seismischen Geschwindigkeit (links) zeigt den großen Kontrast der Schalllaufzeiten im

der Gashydratstabilität an. Demnach sind Gashydrate oberhalb des BSR zu erwarten, darunter existiert freies Gas. Obwohl noch im Einzelfall bestimmte Detailsignaturen nicht ganz verstanden werden, scheint die Bedeutung des freien Gases unterhalb der Zone der Gashydrate die Amplitudenstärke und Ausbildung der BSR-Signaturen zu bestimmen. Wesentlich ist dabei der Kontrast in den seismischen Geschwindigkeiten. Gashydratzementierte Sedimente haben generell höhere Geschwindigkeiten als unzementierte Ablagerungen. Zusätzlich verringert die Existenz von freiem Gas unterhalb des BSR die Schallgeschwindigkeiten drastisch z.T. auf weniger als die im Meerwasser von 1.500 m/s (Abb. 4.15-3). Der Geschwindigkeitskontrast wird dabei maximiert und führt zur optimalen Ausbildung des BSR. Ist kein freies Gas unterhalb der Gashydratzone vorhanden, so wird mit konventioneller Seismik kein BSR registriert, obwohl Gashydrate vorhanden sind. Diese mit geophysikalischen Methoden nicht zu erkennenden Gashydratvorkommen sind der Grund dafür, dass die weltweiten Vorkommen möglicherweise unterschätzt werden.

Neben der BSR-Verteilung gibt vor allem die geologische Probennahme Aufschluss über Gashydratvorkommen. Dies geschah in der Vergangenheit vorwiegend von Bohrschiffen aus im Rahmen der internationalen Programme DSDP und ODP oder durch oberflächennahe Beprobungen von Forschungsschiffen.

Gashydratmenge und Klimawirksamkeit

Im Vergleich ausgewählter, wichtiger Speichergrößen der verschiedensten organischen Kohlenstoffvorkommen der

Erde ist die Menge an Kohlenstoff, die in Gashydraten existiert, enorm groß. Obwohl es bei der globalen Bilanzierung noch Unsicherheiten gibt und andere Kohlenstoffspeicher unberücksichtigt bleiben, wird heute allgemein von einer Größenordnung von 6.000 bis 10.000 Gigatonnen Kohlenstoff ausgegangen, der in Gashydraten gebunden ist. Neuere Arbeiten deuten zwar wiederum in Richtung kleinerer Gashydratmengen, aber Abweichungen in der Abschätzung der globalen Gashydratmenge gab es in den letzten 25 Jahren vielfach nach oben, wie nach unten. Folgt man den Zahlen des IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), so sind die geschätzten 10.000 Gt Kohlenstoff (G = Giga = 10^9), die in Gashydraten festliegen, ein Konsenswert.

Dieser Wert übersteigt die Kohlenstoffmenge der zurzeit bekannten Vorkommen fossiler Brennstoffe bei weitem und stellt somit ein Potenzial für die Zukunft dar, wenn die konventionellen Energieträger ausgeschöpft sein sollten. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass unabhängig von der Treibhausproblematik des Kohlenstoffdioxids aus der Verbrennung des Methans, Fördermethoden entwickelt werden, die einen wirtschaftlichen und umweltschonenden Gashydratabbau sowohl im marinen wie auch im Permafrostbereich ermöglichen. Hierzu gehört auch die Vermeidung von unkontrollierten Emissionen an Methan in die Atmosphäre. Die Gasindustrie verfügt um die Jahrtausende noch über genügend Gasreserven für mehr als eine Generation, so dass nur einzelne Länder, wie z.B. das an Erdöl und Erdgas arme Japan, bedeutende Schritte unternehmen, um eine wirtschaftliche Gewinnung von Gas aus Gashydratlager zu erreichen. Die Förderung aus den Weltmeeren mag zwar aufgrund der größeren Vorkommen attraktiver erscheinen als eine Förderung aus Permafrost-

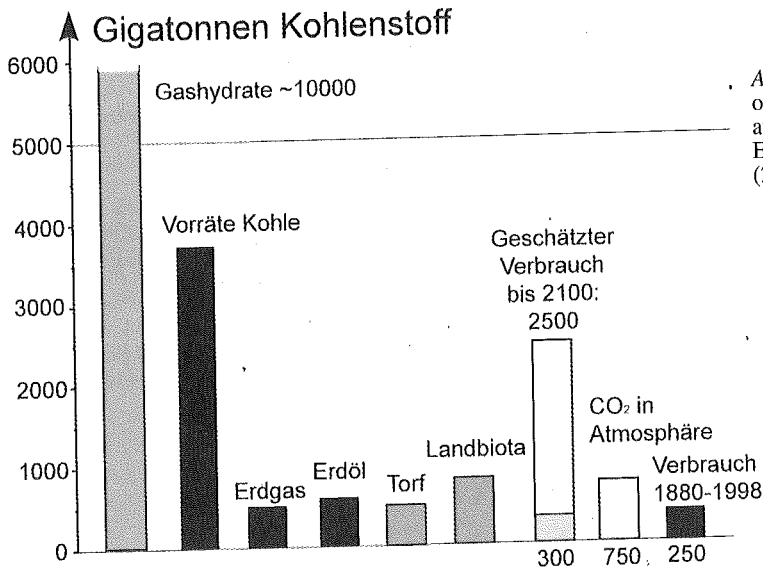


Abb.4.15-4: Mengenanteile von organischem Kohlenstoff einzelner ausgewiesener Speichergrößen der Erde nach Angaben des IPCC (2001).

lagern, ist aber aufgrund der ungleich schwierigeren Förderbedingungen, des Risikos und der bisher unbekannten Umweltauswirkungen wirtschaftlich kurz- bis mittelfristig eher unwahrscheinlich. Die Gasgewinnung aus Gashydraten in Permafrostgebieten, wie sie in geringen Mengen bereits in Sibirien existiert, könnte allerdings in der näheren Zukunft größere Bedeutung erlangen.

Gelangt Methan in die Atmosphäre, so wirkt es ähnlich wie Kohlenstoffdioxid als Treibhausgas – allerdings pro Molekül weit stärker – und ist so an der globalen Erwärmung der Atmosphäre beteiligt. Der Kohlenstoff-Speicher der Atmosphäre ist mit 760 Gt zwar von beträchtlicher Größe, kann aber durch Freisetzung an relativ kleinen Mengen von Methan aus den mit 10.000 Gt geschätzten Gashydratvorkommen (Abb. 4.15-4) bei Destabilisierung erheblich moduliert und verändert werden. So könnte eine erhöhte Methanfreisetzung aus Gashydraten die Glazial-Interglazial-Schwankungen beeinflussen, wobei kontinentale Permafrosthydrate auf Grund ihrer Temperatursensibilität positiv und die ozeanischen Gashydrate vorwiegend durch Meeresspiegelanstieg negativ rückkoppeln.

Bei rascher Destabilisierung werden Gashydrate zu wichtigen Einflussgrößen klimatischer Wechsel, deren Zeitskalen bisher noch wenig verstanden sind (DICKENS 2003). In diesem Zusammenhang dient für das globale Verständnis die extreme Anreicherung des stabilen Isotops ^{12}C im Methan der Gashydrate als wichtiger Tracer.

Einfluss auf submarine Hangstabilität

Gashydrate wirken im Porenraum von marinen Sedimenten zunächst wie Zement und rufen dadurch eine hohe Festigkeit und Stabilität des Meeresbodens hervor. Bei einer relativ frühzeitigen Gashydratbildung in noch

unverfestigten Ablagerungen verhindern sie allerdings durch die Zementierung eine mit zunehmendem lithostatischem Druck erhöhte Verfestigung. Werden nun durch Druck/Temperatur-Schwankungen die porenfüllenden Gashydrate zersetzt, kommt es zu einer starken Abnahme der Bodenfestigkeit, und submarine Rutschungen können die Folge sein. An allen Kontinentalrändern lassen sich Rutschungen unterschiedlicher Größenordnung nachweisen, die in zahlreichen Fällen mit Gashydratvorkommen korrelieren. Ein unmittelbarer Beleg für die Auslösung von Rutschungen durch Gashydratzersetzung lässt sich zwar nur schwer finden, viele Beobachtungen weisen jedoch auf einen ursächlichen Zusammenhang hin. So lassen sich im Umfeld der Abrisskanten von Rutschungskörpern fast immer Spuren von Gas- und Fluidtransport erkennen. Am oberen Kontinentalrand sind außerdem größere Hangneigungen von >4 Grad zu verzeichnen, so dass bei Stabilitätsverlusten, wie durch Gashydratfreisetzung verursacht, ein verstärkter gravitativer Transport einsetzen kann. Die zunehmende Volumenausdehnung der aus dem Gashydrat freiwerdenden Gasmenge bei abnehmender Wassertiefe scheint hierbei eine große Rolle zu spielen (Abb. 4.15-5). So ist in ca. 650 m Wassertiefe bei einer Gashydratzersetzung das Volumen an freiwerdendem Gas und Wasser fast dreimal so hoch wie das eigentliche Gashydratvolumen. Der enorme Porendruck, der bei der Gashydratzersetzung am oberen Kontinentalrand durch diese Volumenausdehnung entsteht, führt zu einer starken Abnahme der Festigkeit und der vorhandene große Porenraum zu einer hohen Deformierbarkeit.

Über die kurzzeitig freiwerdenden mechanischen Energien, die Methanmengen sowie die langfristigen Auswirkungen auf den Lebensraum lässt sich gegenwärtig jedoch nur spekulieren. Von der so genannten Storegga-Rutschung (Abb. 4.15-6) am Kontinentalhang vor Süd-

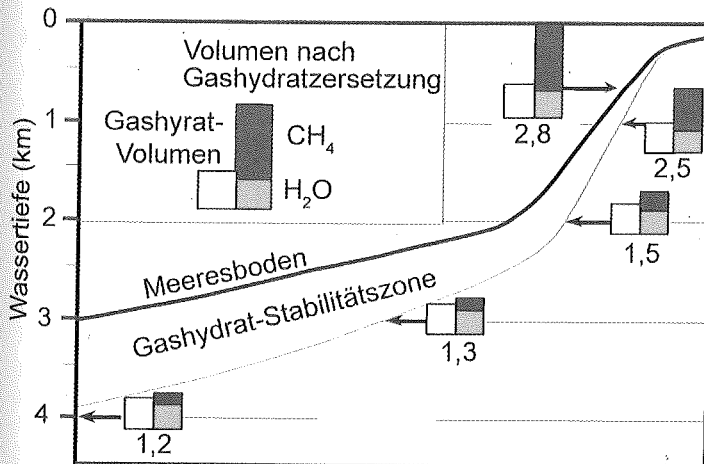


Abb.4.15-5: Volumenausdehnung bei Gashydratzersetzung; Mächtigkeit der Gashydratstabilitätszone im Meeresboden (unter Annahme eines geothermischen Gradienten von $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$), in Abhängigkeit von der Wassertiefe (dicke Linie). Die Balkendiagramme zeigen die ebenfalls tiefenabhängige Volumenzunahme (Zahlenangabe = Faktor der Volumenzunahme) eines konstanten Gashydratvolumens bei Zersetzung.

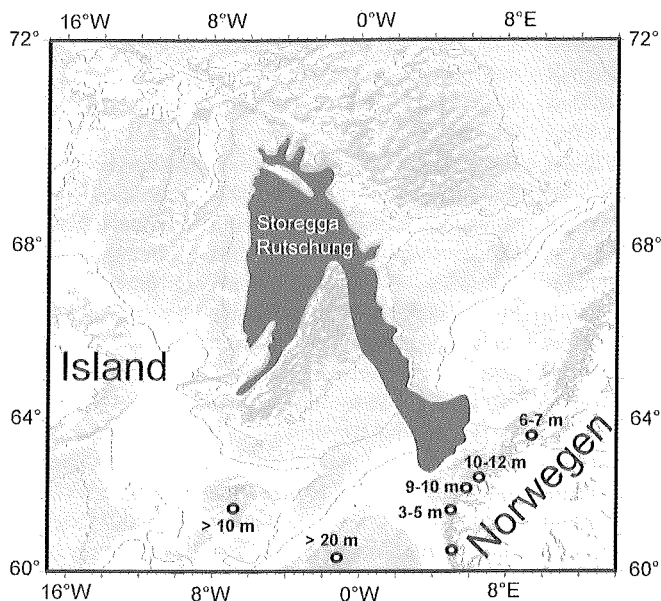


Abb. 4.15-6: Die Storegga Rutschung am norwegischen Kontinentalhang ist eine der größten Rutschungen. Das Rutschungsereignis vor 8.000 Jahren führte zu einer Flutwelle, die im Bereich angrenzender Küsten zu einer Wellenhöhe bis zu 20 m geführt hat. Die Kreise und Zahlenangaben markieren Stellen geologischer Dokumentation der aufgelaufenen Flutwellenhöhe (nach BONDEVIK et al. 2003).

norwegen ist eine Flutwelle durch Ablagerungen in norwegischen Fjorden bekannt. Die *Storegga*-Rutschmasse ist mit einem Gesamtvolumen von 5.608 km³ eine der größten bisher bekannten Rutschungen. Sie erfolgte in drei Phasen vor ca. 50.000 bis 30.000, vor 8.000 und 6.000 Jahren, wobei die größte Masse bereits während des ersten Ereignisses transportiert worden ist und eine mächtige Flutwelle ausgelöst hat. Die geologischen Ablagerungen der *Storegga*-Flutwelle dokumentieren entlang der Küste Süd-Norwegens, dass die Flutwelle eine Mindesthöhe von 10–12 m über dem damaligen Meeresspiegel hatte. Eine Wellenhöhe von mehr als 20 m sind auf den Shetland Inseln durch Ablagerungen des Tsunami vor kurzem bekannt geworden (BONDEVIK et al. 2004). Je nach Küstenmorphologie und Dichte der Bevölkerung könnten derartige Flutwellen heute erheblichen Schaden an-

richten, ähnlich wie aktuell an den Küstenzonen des Indischen Ozeans als Folge eines gewaltigen untermeerischen Bebens.

Fazit und Ausblick

Obwohl Gashydrate schon fast 200 Jahren bekannt sind, tritt ihre Bedeutung auf unserem Planeten erst so langsam in unser Bewusstsein. Im Gegensatz von zunächst prinzipiellen Fragestellungen, wie nach dem Strukturaufbau und ihrer Stabilität stehen heute mehr globale Fragen, wie nach der Klimabeeinflussung und der einer möglichen rohstofflichen Nutzung der Gashydrate im Zentrum. Die Forschungsanstrengungen einzelner Länder, sowie die zahlreichen internationalen Forschungsinitiativen lassen in den nächsten Jahrzehnten spannende neue Erkenntnisse erwarten ♦